

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 220 КВ
INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR REDUCING LOSSES IN 220 KV NETWORKS**

Аннотация: В статье рассмотрены инновационные технологии, направленные на повышение эффективности работы электрических сетей 220 кВ путем снижения потерь электроэнергии. Показана целесообразность их применения для минимизации потерь электроэнергии.

Abstract: The article discusses innovative technologies aimed at increasing the efficiency of 220 kV electrical networks by reducing electricity losses. The feasibility of their use to minimize electricity losses is shown.

Ключевые слова: эффективность, надежность, компенсирующее устройство, провода, потери.

Keywords: efficiency, reliability, compensating device, wires, losses.

Эффективность работы электрических сетей определяется в значительной степени уровнем потерь электроэнергии. В электрических сетях они возникают при транспорте и распределении электроэнергии. В развитых странах относительные потери электроэнергии составляют порядка 4-5 %. Предельными являются потери на уровне 10% [4]. По данным компании «Россети» относительные потери электроэнергии за 2021 год составили 7,34%, что выше уровня потерь в развитых странах и не соответствует оптимальным условиям эксплуатации. Высокий уровень потерь в сетях напряжением 220 кВ снижает пропускную способность линий электропередачи, увеличивает коэффициент загрузки силовых трансформаторов и оборудования, что приводит к ухудшению статической устойчивости электроэнергетической системы и системной надежности. Высокий уровень потерь приводит к повышенным эксплуатационным затратам и влияет на прибыль электросетевых комплексов. Поэтому потери электрической энергии следует минимизировать.

Целью данной работы является обоснованный выбор инновационных технологий для минимизации технологических потерь электроэнергии в сетях напряжением 220 кВ и оценка их эффективности.

Для реализации поставленной цели решены следующие задачи:

1. Выбор и обоснование целесообразности применения инновационных технологий для снижения потерь электроэнергии;
2. Характеристика выбранных инновационных технологий;
3. Оценка эффективности снижения потерь электроэнергии при применении инновационных технологий.

Рассмотрим структуру технологических потерь электроэнергии, характерную для сетей 220 кВ. Она состоит из метрологических и технических потерь электрической энергии. Метрологические потери связаны с погрешностью измерения приборов учета электроэнергии, измерительных трансформаторов, устройств сбора и передачи данных (УСПД). Наиболее значимые технические потери состоят из нагрузочных потерь в силовых трансформаторах и автотрансформаторах, кабельных и воздушных линиях, которые зависят от потребляемой мощности, и условно – постоянных, включающих расход на собственные нужды подстанций, потери холостого хода в стали силовых трансформаторов или



автотрансформаторов, а также потери электроэнергии на корону [8]. Снижая эти составляющие потерь электроэнергии, можно решить рассмотренные выше проблемы. Наиболее значимый эффект может быть достигнут применением инновационных технологий в сетях 220 кВ.

Нагрузочные потери электроэнергии в оборудовании подстанций и линиях электропередачи можно снизить с помощью устройств FACTS 2 поколения и проводов нового поколения (ПНП). Условно – постоянные потери на собственные нужды можно компенсировать с помощью возобновляемых источников энергии, подключенных к подстанциям. Их возможные варианты определяются климатическими условиями места расположения подстанции. Это могут быть солнечные панели, ветровые установки, гибридные электрические станции в сочетании с системами накопления электроэнергии. Они также обеспечат дополнительный резерв мощности в сети на случай аварийного отключения подстанции от сети для бесперебойного электроснабжения потребителей первой и второй категории по надежности. Потери электроэнергии, возникающие при коронировании проводов, могут быть снижены за счет замены традиционных проводов на провода нового поколения. Условно – постоянные потери холостого хода минимизируются при помощи устройств FACTS 2 поколения. Метрологические потери снижаются при переходе на интеллектуальную систему учета электроэнергии или при замене традиционных измерительных трансформаторов на цифровые или оптические измерительные трансформаторы.

На рисунке 1 показано соответствие выбранных инновационных технологий структуре потерь электроэнергии в электрической сети 220 кВ.

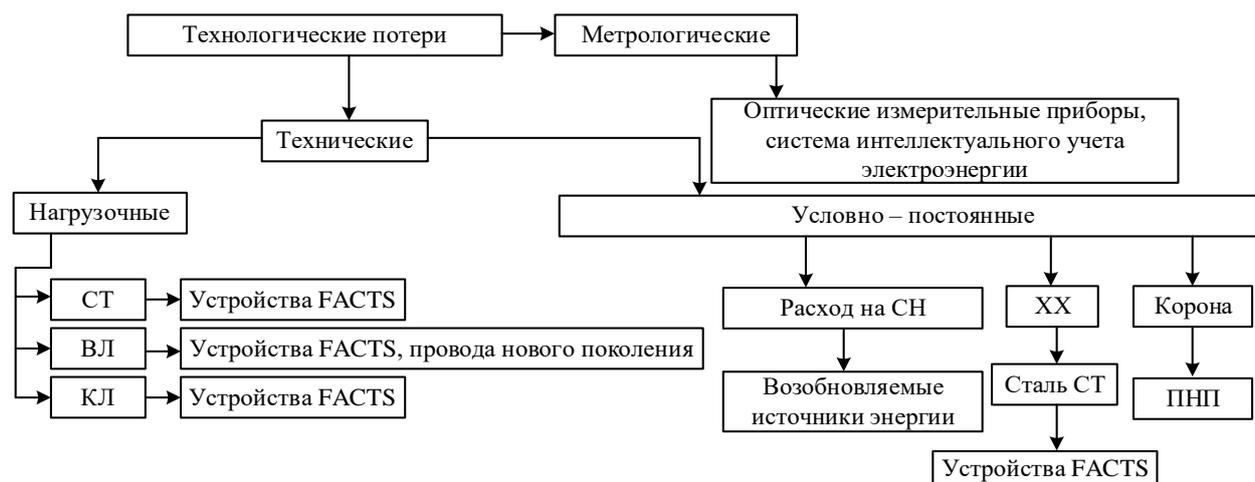


Рис. 1 – Выбор инновационных технологий для снижения структурных составляющих технологических потерь электроэнергии

Из устройств FACTS 2 поколения для снижения потерь электроэнергии целесообразно использовать устройства регулирования напряжения и потоков реактивной мощности, подключаемые к сетям параллельно, такие как статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ), синхронный статический продольный компенсатор (ССПК), асинхронизированный синхронный компенсатор (АСК) и другие. Их выбор обоснован как генерацией, так и потреблением реактивной мощности в диапазоне от -100% до + 100% установленной мощности устройства, что соответствует всем возможным установившимся режимам в сети, включая утяжеленные, послеаварийные и ремонтные.

Статический синхронный компенсатор – синхронный источник реактивной мощности, за счет которого поддерживается заданный уровень напряжения и поток реактивной мощности, протекающей по сети, а также обеспечивается качество электроэнергии. СТАТКОМ состоит из преобразователя напряжения с емкостным накопителем на стороне постоянного тока, трансформатора связи и системы управления.



Управляется данное устройство с помощью биполярных транзисторов с изолированным затвором. Принцип действия данного устройства основан на изменении напряжения вентильной обмотки. Если напряжение сетевой обмотки больше напряжения вентильной, то СТАТКОМ потребляет реактивную мощность и работает в режиме выпрямителя, если меньше – отдает реактивную мощность и работает в режиме инвертора [9, 11].

За счет компенсации реактивной мощности в сети они снижают нагрузочные потери в линиях и оборудовании подстанций. Поддержание заданного напряжения обеспечивает снижение условно-постоянных потерь.

Покажем на простейшем примере, как эти устройства влияют на нагрузочные потери электроэнергии в линиях, силовых трансформаторах и условно-постоянные потери.

Нагрузочные потери в линиях и двухобмоточных трансформаторах рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_{л} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R. \quad (1)$$

Например, при передаче активной мощности, равной 60 МВт, и реактивной, равной - 30 Мвар, по проводу марки АС – 240/56 длиной 100 км и напряжении в узле сети 250 кВ потери активной мощности до установки устройств FACTS составят:

$$\Delta P_{л} = \frac{60^2 + (-30)^2}{250^2} \cdot 12,18 = 0,877 \text{ МВт.}$$

Так как рассмотренные устройства могут компенсировать реактивную мощность до 0, то потери в этом случае составят:

$$\Delta P_{л} = \frac{60^2}{250^2} \cdot 12,18 = 0,702 \text{ МВт.}$$

Нагрузочные потери в линии после установки устройств FACTS снизились на 20% (0,17 МВт). Рассчитаем снижение потерь электроэнергии в рублях за год:

$$I_{w} = \Delta W \cdot C \cdot t, \quad (2)$$

где ΔW – снижение потерь электроэнергии за рассматриваемый период t ;

C – стоимость потерь электроэнергии, равная 0,5 руб./кВт·ч [12].

$$I_{w} = 175 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 766500 \text{ руб.}$$

Определим нагрузочные потери в силовых трансформаторах, например, марки ТРДЦН – 63000/220 до установки устройств FACTS.

$$\Delta P_{т} = \frac{1}{2} \cdot \frac{60^2 + (-30)^2}{250^2} \cdot 3,9 = 0,14 \text{ МВт.}$$

Потери после установки устройств FACTS составят:

$$\Delta P_{т} = \frac{1}{2} \cdot \frac{60^2}{250^2} \cdot 3,9 = 0,112 \text{ МВт.}$$

Потери снизились на 20% (0,028 МВт).

В денежном эквиваленте эффект от снижения потерь составит:

$$I_{w} = 28 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 122640 \text{ руб.}$$

Потери холостого рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_{x.x.} = \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^2 \cdot P_{x.x.}. \quad (3)$$

Например, потери холостого хода трансформаторов ТРДЦН – 63000/220 при напряжении в линии до регулирования составляют:

$$\Delta P_{x.x.} = \left(\frac{250}{220} \right)^2 \cdot 82 \cdot 2 = 211,777 \text{ кВт.}$$

При поддержании напряжения на уровне 220 кВ с помощью устройства FACTS потери составят:

$$\Delta P_{x.x.} = \left(\frac{220}{220} \right)^2 \cdot 82 \cdot 2 = 164 \text{ кВт.}$$



Потери снизились на 22,56% (47,777 кВт).

В денежном эквиваленте эффект от снижения потерь составит:

$$I_w = 47,777 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 209263,26 \text{ руб.}$$

Из проводов нового поколения для снижения потерь электроэнергии целесообразно принять высокотемпературные провода (ВТП). Они состоят из стальной жилы и термостойкого алюминиевого сплава поверх жилы. Преимущество этих проводов заключается в том, что они способны выдерживать длительно допустимую температуру от 150 до 210 °С в зависимости от марки и имеют меньшее электрическое сопротивление. Соответственно замена перегруженных проводов на провода нового поколения, а именно ВТП, позволит снизить нагрузочные потери в линиях, условно – постоянные потери на коронный разряд и повысить пропускную способность.

Сравним потери в проводах марки АС – 240/56, сопротивление которого равно 12,18 [13], и АСВТ – 258/73, сопротивление которого равно 11,32 [10]. Потери в линии, выполненной проводами марки АС – 240/56, равны:

$$\Delta P_{л} = \frac{60^2 + (-30)^2}{250^2} \cdot 12,18 = 0,877 \text{ МВт.}$$

Потери в линии, выполненной проводами марки АСВТ – 258/73, равны:

$$\Delta P_{л} = \frac{60^2 + (-30)^2}{250^2} \cdot 11,32 = 0,815 \text{ МВт.}$$

Потери снизились на 7% (0,062 МВт).

В денежном эквиваленте эффект от снижения потерь составит:

$$I_w = 62 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 271560 \text{ руб.}$$

Нагрузочные потери в линиях при компенсации реактивной мощности до 0 и использования провода АСВТ – 258/73 составят:

$$\Delta P_{л} = \frac{60^2}{250^2} \cdot 11,32 = 0,652 \text{ МВт.}$$

Потери снизились на 25,66% (0,225 МВт).

Следовательно, суммарно нагрузочные потери в линиях и трансформаторах при компенсации реактивной мощности до 0 с помощью устройств FACTS 2 поколения и использования провода АСВТ – 258/73 снизятся на 24,88% (0,253 МВт·ч).

В денежном эквиваленте эффект от снижения потерь составит:

$$I_w = 0,253 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 1108140 \text{ руб.}$$

Для провода АС – 240/39 длиной 100 км потери на корону составят:

$$\Delta P_{к} = 3,85 \cdot 100 = 0,385 \text{ МВт.}$$

Если провод АС – 240/56 заменить на ПНП АСк2у – 240/39, для которого удельные потери на корону равны 2,1 кВт/км [2], то для линии:

$$\Delta P_{к} = 2,1 \cdot 100 = 0,21 \text{ МВт.}$$

Потери снизились на 45,45% (0,175 МВт).

В денежном эквиваленте эффект от снижения потерь составит:

$$I_w = 175 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 766500 \text{ руб.}$$

Так как сопротивление провода АСк2у составляет 0,121 Ом/км [11] (то есть, как и у АС – 240), то нагрузочные потери будут такими же.

Собственные нужды подстанции – это совокупность вспомогательных устройств и относящейся к ним электрической части, обеспечивающих работу подстанции. Их можно возместить путем сооружения и подключения к подстанции нетрадиционных источников энергии (солнечная и ветряная электростанции или гибридная). Рассмотрим гибридную электростанцию, а именно солнечно – ветровую. Она состоит из солнечных панелей, ветрогенераторов, контроллеров заряда аккумуляторов, инверторов и повышающего трансформатора. Схема подключения приведена на рисунке 2. При соответствующих условиях погоды и климата электроэнергия будет поступать от ветрогенератора и/или



солнечных панелей, далее преобразовываться в переменную через инвертор, после чего будет идти к трансформатору собственных нужд. В темное время суток и отсутствия ветра потребители собственных нужд могут получать электроэнергию от накопителей или из системы. В случае разрядки аккумуляторов необходимо будет включать трансформатор собственных нужд и получать электроэнергию от внешней сети. Для наилучшей эффективности аккумуляторы рекомендуется соединять параллельно – последовательно.

При значительном изменении мощности инвертор будет работать со значительной нагрузкой. Поэтому рекомендуется установка 2 инверторов [1].

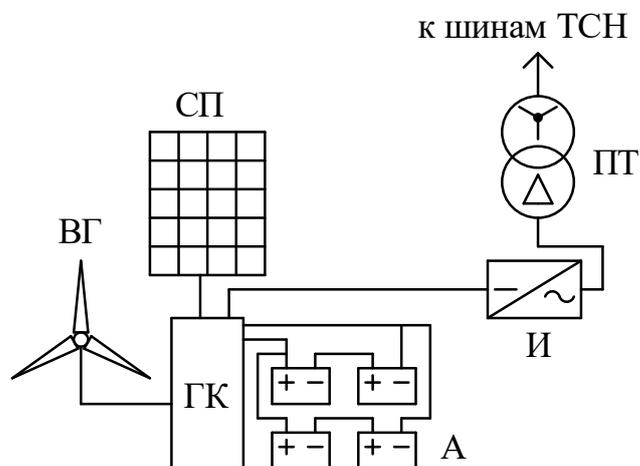


Рис. 2 – Схема подключения гибридной электростанции к электрической сети

На схеме приняты следующие сокращения: ВГ – ветрогенератор, СП – солнечная панель, ГК – гибридный контроллер, А – аккумуляторы, И – инвертор, ПТ – повышающий трансформатор, ТСН – трансформатор собственных нужд.

В классических трансформаторах тока есть не только основная погрешность, но и дополнительная, которая возникает из-за гармоник, не оптимальной загрузки вторичных цепей, их взаимного влияния и температуры. В оптических трансформаторах эти дополнительные погрешности компенсируются, то есть эти погрешности устраняются так, чтобы сами трансформаторы во всем рабочем диапазоне влияющих факторов находились в заданном классе точности. Трансформаторы состоят из внешней части, в которой чувствительный оптический элемент крепится изоляционную опорную колонну с соединительным оптическим кабелем, и внутренней, состоящей из электроники.

Для обеспечения точности измерений в соответствии с требованиями класса точности измерений 0,2s (расширенный диапазон в области малых погрешностей) в приборах применен метод цифровой компенсации температурной погрешности при малых значениях токов. С этой целью программой для расчета тока учитывается температурная зависимость чувствительности. Сигнальный процессор каждую секунду в онлайн-режиме считывает сигнал, пропорциональный температуре, измеренной оптоволоконным термометром, который расположен рядом с основным чувствительным волокном. На основе считанных сигналов процессор вычисляет значение силы тока в шине с учетом влияния температуры на чувствительный элемент. Надежность вышеописанной компенсации обусловлена тем, что температурная зависимость чувствительности носит фундаментальный физический характер и не может изменяться с течением времени. Для долговременной работы оптических трансформаторов и контроля состояния волоконного датчика тока имеет большое значение встроенная в прибор система онлайн-диагностики, обеспечиваемой наличием специального диагностического порта, который может работать в режиме удаленной диагностики, или путем формирования общего статуса работоспособности по стандарту МЭК 61850-8-1 [6].

Рассчитаем метрологические потери для традиционного трансформатора тока и трансформатора напряжения с классом точности 0,5:



$$\Delta W_{\text{погр}} = 0,01 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2 \cdot W_i^2 + \sum_{j=1}^n \delta_j^2 \cdot W_j^2}, \quad (4)$$

где $\delta_i(\delta_j)$ – погрешность измерительного канала принятой (отданной) активной электроэнергии;

$W_i(W_j)$ – прием (отдача) электроэнергии, зафиксированной измерительными каналами активной электроэнергии.

$$\Delta W_{\text{погр}} = 0,01 \cdot \sqrt{30000^2 \cdot 1,5^2 + 30000^2 \cdot 1,5^2} = 636,396 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Для оптических трансформаторов тока и напряжения с классом точности 0,2s потери составят:

$$\Delta W_{\text{погр}} = 0,01 \cdot \sqrt{30000^2 \cdot 0,75^2 + 30000^2 \cdot 0,75^2} = 318,198 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Метрологическая составляющая потерь электроэнергии снизилась на 50% (318,198 кВт·ч).

В денежном эквиваленте эффект от снижения потерь составит:

$$I_w = 318,198 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 1393707 \text{ руб.}$$

При применении инновационных технологий потери электроэнергии снизились суммарно:

нагрузочные на 0,253 МВт·ч (24,88%);

условно – постоянные на 0,223 МВт·ч (37,33%);

метрологические на 0,318 МВт·ч (50%).

Общая величина снижаемых потерь в рассматриваемом примере составила 0,777 (31,33%).

Полученные значения подтверждают эффективность комплексного применения инновационных технологий для снижения потерь электроэнергии.

Выводы

1. Показана структура технологических потерь электроэнергии в сетях 220 кВ.
2. Выбраны целесообразные инновационные технологии для минимизации наиболее значимых структурных составляющих потерь электроэнергии;
3. Приведена характеристика инновационных технологий с точки зрения их воздействия на структурные составляющие потерь.
4. Показано влияние выбранных инновационных технологий на уровень потерь электроэнергии.

Список литературы:

1 Бекиров, Э. А. Оптимизация режимов работы систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии / Э. А. Бекиров, М. М. Асанов, А. Алькаата // Строительство и техногенная безопасность – 2018. – № 13. – С. 107 – 111.

2 Вихарев, А.П. Исследование характеристик коронного разряда для компактированных проводов АЕРО-Z / А. П. Вихарев, А. В. Вильнер // Общество, наука, инновации : материалы всероссийской ежегодной научно – практической конференции (Киров, 15–16 апреля 2013) / Киров : ВятГУ, 2013. – С. 2087 – 2019.

3 Едемский, С. Н. Использование устройства компенсации реактивной мощности СТАТКОМ в электроэнергетической системе / С. Н. Едемский, И. И. Пушкаренко, О. В. Тригуб // Энергобезопасность и энергосбережение – №3. – 2013. – С. 27 – 30.

4 Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство. / Ю. С. Железко. – М. : НЦ ЭНАС, 2009 – 456 с.

5 Киселев, Г. Ю. Потери электрической энергии в электрических сетях / Г. Ю. Киселев [и др.] // Энергетика и электротехника – № 1. – 2023. – С. 80 – 85.

6 Найденов, А. Д. Оптические трансформаторы тока / А. Д. Найденов // Вестник науки и образования – № 8. – 2020. – С. 19 – 23.

7 О гладких проводах и короне (avatok.ru).



8 Савина, Н. В. Методы расчета и анализа потерь электроэнергии в электрических сетях / Н. В. Савина. – Благовещенск : Изд-во АмГУ, 2014. – 150 с.

9 Солони́на, Н. Н. Новые технологии компенсации реактивной мощности / Н. Н. Солони́на, К. В. Суслов, З. В. Солони́на // Вестник ИрГТУ – № 5. – 2016. – С. 135 – 143.

10 СТО 56947007- 29.060.50.268-2019. Указания по проектированию ВЛ 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поколения.

11 Тухватуллин, М. М. Анализ современных устройств FACTS, используемых для повышения эффективности функционирования электроэнергетических систем России / М. М. Тухватуллин [и др.] // ЭСиК – № 3. – 2015. – С. 41 – 46.

12 [ФАС России | Федеральная служба по тарифам упразднена \(fas.gov.ru\)](http://fas.gov.ru)

13 Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии - Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 8-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство МЭИ, 2008. – 964 с.

